

三次元画像に基づく臓器切離プロセスのモデリング

中尾 恵¹⁾, 田浦 康二郎²⁾, 松田 哲也¹⁾

1) 京都大学大学院 情報学研究科, 2) 京都大学医学部附属病院 肝胆膵移植外科

1. はじめに

臓器に対する腫瘍の切離・切除は多くの診療科において実施される基本手技の一つである。臓器内部の腫瘍の位置によっては切離パスが複雑になることも多く、術中には臓器表面や切離時に現れる脈管等の一部の内部構造を視認することしかできないため、慎重な処置が求められる。出現した脈管を誤って他の脈管と認識する危険性の軽減を目的として、患者個人の三次元画像を用いた術前計画が広く実施されている。術中 CT/MRI や超音波計測を活用した手術も試みられているが、多くの内視鏡手術では術中計測の機会は限られるため、術前計画の内容を参照した術中ナビゲーションも検討されている。

一方、手術時には、呼吸による自律的な運動に加えて、術野の確保、臓器に対する切除や変形などの手術操作により臓器形状は時間変化する[1]。術前に取得された三次元画像と術中の臓器形状の間に生じる乖離は、手術ナビゲーションの適用範囲を制限する主な要因となっている。計画通りの手術の遂行が難しい場合も多く、術中に想定される局所的な視野、臓器の状態を幾何学的・力学的に推定するニーズが高まっている[2][3]。患者個人の三次元画像に基づく手術プロセスのモデリングと時間変化を含めたシミュレーション、術中変形に対応した可視化の達成は、現状の手術支援システムにおける研究課題の一つとなっている。

本研究では、患者個人の三次元画像を用いた臓器切離プロセスのモデリング方法を提案する。切離における位相構造の変化を事前知識として保持するメッシュモデルを導入する。メッシュを三次元画像と入力された切離面に位置合わせすることで、切離時に出現する脈管構造の可視化を達成し、視覚表現の質と実時間性の両立を可能とする。本発表では、提案方法を肝切除プロセスの時系列シミュレーションに適用し、手術時に想定される切離面と臓器変形を数例シミュレートした結果を報告する。

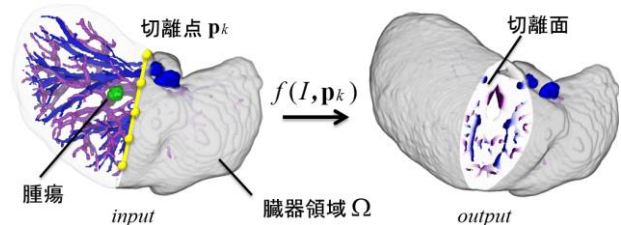


図 1. 三次元画像に基づく臓器切離プロセスシミュレーションの概念図

2. 臓器切離プロセスのモデリング

提案方法は、臓器領域が抽出された患者個人の三次元画像 I 、切離パス上の頂点群 \mathbf{p}_k を入力として受け付け、切離時の構造変化を含む臓器形状の可視化結果を出力する関数 $f(I, \mathbf{p}_k)$ として記述される(図 1)。ただし、本法は単一の滑らかな曲面によって臓器領域を二つに分割する場合を対象とする。ここで、三次元画像内の対象臓器の領域は空間的に連続であるのに対し、切離後の臓器では空間的に一部不連続な構造が表現されなければならない。この構造変化を表現するメッシュモデルをバックグラウンドで自動生成し、三次元画像と併用する。

最初に、対象臓器の概形と切離パスの曲面を事前知識として内包する初期メッシュ M を準備する。患者個人の三次元画像 I と切離点 \mathbf{p}_k が与えられたとき、 M の頂点群は曲面の幾何学的な制約を満たしつつ、初期メッシュの頂点群の相対位置をできるだけ保存するように再配置される。頂点再配置後のメッシュモデルの変形は有限要素法に基づいて計算され、四面体メッシュのボリュームレンダリング[4][5]によって変形した像として可視化される。

本方法は、従来の切開アルゴリズム研究[6]の文脈においては、メッシュの分割によらず、頂点の再配置によって切離面を表現するアプローチとみなせるが、初期切離面と患者固有の切離面との対応を表現できる、切離表現に用いるメッシュの頂点数を任意

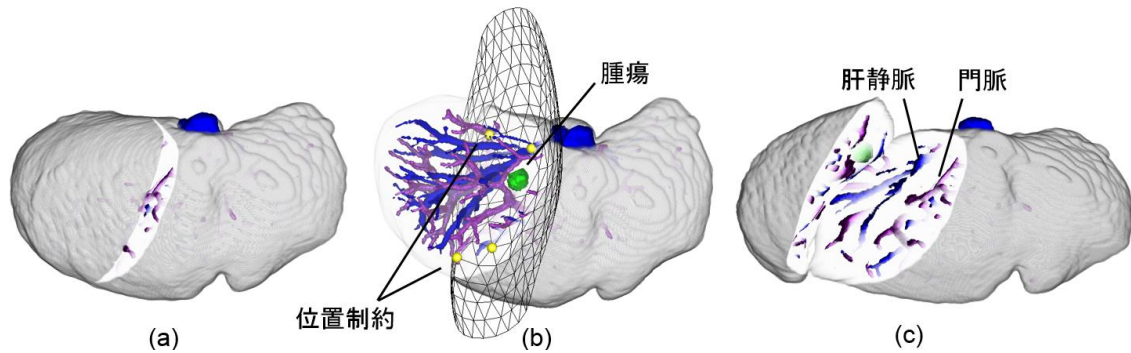


図2. 患者個人の三次元画像に基づく肝切除プロセスのシミュレーション結果, (a) 臓器変形を伴う切開表現, (b) 位置制約を満たす曲面形状の切離面の算出, (c) 切離面上に現れる血管構造の可視化

に設定でき、シミュレーション時に増減しないため、視覚的表現の質と計算コストを見積ることができる、いびつな要素の発生を軽減した安定なシミュレーションを実現できる等の特徴を有する。紙面の都合上、アルゴリズムの詳細については他誌に委ねる。

3. 肝切除シミュレーション結果

図2は肝臓領域を抽出した患者個人の三次元CT画像(256³voxel)に対して、肝切除プロセスを時系列的にシミュレートした結果を示している。切離による構造変化と臓器変形のシミュレートによって、切離面上に出現する肝静脈および門脈が可視化されている。マウスによって指定された血管上の切離予定箇所を位置制約とすることによって、局所的に曲率に変化する滑らかな切離面が表現されている。今回のシミュレーションに用いたメッシュの頂点数は594点で固定であり、一連の処理(初期メッシュの三次元画像に対する位置合わせ、有限要素法に基づく変形計算、ボリューム可視化)は汎用PC(CPU: 3.5GHz, Memory: 8GB, GPU: NVIDIA GeForce 780)において毎秒10フレーム以上の更新レートが達成可能であった。本シミュレーションの実施に必要なとする前処理は臓器・血管領域の抽出のみであり、医療従事者が術前に切離プロセスを確認し、術中に参照する等の用途に有効と考えられる。

謝辞

本研究は京都大学 COI STREAM「活力ある生涯のためのLast5Xイノベーション拠点」及び日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究B「臓器変形・力

学特性のスパースモデリング及び術中推定に関する研究」(課題番号: 15H03032)の助成による。

参考文献

- 1) O. Heinzmann, S. Zidowitz, H. Bourquain, S. Potthast, H.O. Peitgen, D. Oertli and C. Kettelhack, Assessment of intraoperative liver deformation during hepatic resection: Prospective Clinical Study, *World J Surg*, Vol. 34, No. 8, pp. 1887-1893, 2010.
- 2) C. Hansen, S. Zidowitz, A. Köhn, M. Hindennach and H. Peitgen, Intraoperative adaptation and visualization of preoperative risk analyses for oncologic liver surgery, *Proc. SPIE*, Vol. 6918, 2008.
- 3) M. Nakao, Y. Oda, K. Taura, and K. Minato, "Direct Volume Manipulation for Visualizing Intraoperative Liver Resection Process", *Comp. Methods Prog. Biomed*, Vol. 113, No. 3, pp. 725-735, 2014.
- 4) M. Nakao and K. Minato, "Physics-based Interactive Volume Manipulation for Sharing Surgical Process", *IEEE Trans. on Info. Tech. in Biomed.*, Vol.14, No. 3, pp. 809-816, 2010.
- 5) K. W. C. Hung, M. Nakao, K. Yoshimura et al. "Background-incorporated Volumetric Model for Patient-specific Surgical Simulation: A Segmentation-free, Modeling-free Framework", *Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 6, No. 1, pp. 35-45, 2011.
- 6) Wu, Jun, Westermann, Rüdiger and Dick, Christian, "Physically-based Simulation of Cuts in Deformable Bodies: A Survey", *Eurographics - State of the Art Reports*, 2014.